

Evaluasi Kegagalan dan Perbaikan Lereng Galian Tanah Pasir Kelempungan Pada Jalan Tol Trans Sumatera Ruas Pekanbaru – Dumai KM 23+175 S.D 23+375

Frandika Rizal Nuryansyah*, Trihanyndio Rendy Satrya, Indrasurya B. Mochtar

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: frandikanuryansyah@gmail.com*, trendysatrya@its.ac.id, indrasurya@ce.its.ac.id

Keywords:

Slope Stability;
Geostudio;
Slope Repair;
Groundwater Table;
Crack Soil

Abstract

The construction of toll roads often faces geotechnical problems, one of which is an avalanche on the Trans Sumatra Toll Road Pekanbaru – Dumai KM 23 + 175 to 23 + 375 side B which is composed of loose to medium consistency sand sand soil and has been repaired with shotcrete, soil nailing, horizontal drain, and median concrete barrier. This study aims to investigate the mechanism of slope failure, evaluate the effectiveness of repair design using Geostudio Slope/W with conventional methods and crack soil approaches, and compare various handling alternatives to improve long-term slope stability. Modelling was carried out by varying groundwater level depth (-12m and -15m) and a crack soil approach to identify the most critical conditions. The results showed that the combination of groundwater level at a depth of -12m and the assumption of crack soil resulted in the most critical safety number (<1.00), while the evaluation of alternative handling concluded that groundwater level control through subdrains was the most significant effort to improve stability. Evaluations of the construction of the built improvements show that the slopes are in stable condition, but not all of them have the same safety figures; In high ground water conditions, stability decreases drastically to 1.12–1.25, which is identified in the field through water seepage from shotcrete cracks during sunny weather. This study recommends the addition of subdrains, the closure of shotcrete cracks, the installation of monitoring instruments (inclinometers and shear pegs), and the construction of surface channels to ensure long-term stability.

Kata Kunci:

Stabilitas lereng;
Geostudio;
Perbaikan Lereng;
Muka Air Tanah;
Crack Soil

Abstrak

Pembangunan jalan tol sering menghadapi permasalahan geoteknik, salah satunya longsoran pada Jalan Tol Trans Sumatera Ruas Pekanbaru – Dumai KM 23+175 s.d 23+375 sisi B yang tersusun oleh tanah pasir kelempungan konsistensi lepas hingga medium dan telah diperbaiki dengan shotcrete, soil nailing, horizontal drain, serta median concrete barrier. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi mekanisme kegagalan lereng, mengevaluasi efektivitas desain perbaikan menggunakan Geostudio Slope/W dengan metode konvensional dan pendekatan crack soil, serta membandingkan berbagai alternatif penanganan untuk meningkatkan stabilitas lereng jangka panjang. Pemodelan dilakukan dengan memvariasikan kedalaman muka air tanah (-12m dan -15m) dan pendekatan crack soil untuk mengidentifikasi kondisi paling kritis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi muka air tanah kedalaman -12m dan asumsi crack soil menghasilkan angka keamanan paling kritis ($<1,00$), sementara evaluasi alternatif penanganan menyimpulkan bahwa pengendalian muka air tanah melalui subdrain merupakan upaya paling signifikan dalam meningkatkan stabilitas. Evaluasi pada konstruksi perbaikan terbangun menunjukkan lereng

dalam kondisi stabil, namun tidak seluruhnya memiliki angka keamanan yang sama; pada kondisi muka air tanah tinggi, stabilitas menurun drastis ke angka 1,12–1,25, yang teridentifikasi di lapangan melalui rembesan air dari retakan shotcrete saat cuaca cerah. Penelitian ini merekomendasikan penambahan subdrain, penutupan retakan shotcrete, pemasangan instrumen pemantauan (inclinometer dan patok geser), serta pembangunan saluran permukaan untuk menjamin stabilitas jangka panjang..

PENDAHULUAN

Infrastruktur jalan merupakan infrastruktur penunjang yang menjadi salah satu faktor paling fundamental dalam menentukan pertumbuhan ekonomi suatu bangsa. Konektivitas dan kondisi jalan yang laik dan andal secara signifikan dapat menekan besaran biaya transportasi dan biaya logistik sehingga harga komoditas/barang juga dapat lebih murah ((BSN), 2017; Das, 2016; Institution, 2011; Lazarte et al., 2015; Umum, 1987). Salah satu infrastruktur jalan yang diharapkan dapat menjamin kelancaran alur distribusi barang adalah infrastruktur jalan bebas hambatan (jalan tol). Sayangnya, sampai dengan awal tahun 2010-an, belum seluruh wilayah di Indonesia terhubung oleh infrastruktur jalan bebas hambatan, khususnya kota – kota di luar Pulau Jawa (Geoengineer.org, 2021a, 2021b; Prasad, 2017; Rahardjo et al., 2003; Sabatini et al., 1999).

Menjawab tantangan tersebut, Pemerintah melalui Peraturan Presiden Nomor 100 Tahun 2014, yang kemudian diperbarui melalui Peraturan Presiden Nomor 117 Tahun 2015 dan Peraturan Presiden Nomor 131 Tahun 2022, menugaskan PT Hutama Karya (Persero) untuk mempercepat penyediaan infrastruktur jalan tol di Pulau Sumatera. Jaringan Jalan Tol di Pulau Sumatera atau yang lebih dikenal sebagai Jalan Tol Trans Sumatera direncanakan menghubungkan Kota Bandar Lampung sampai dengan Kota Banda Aceh sepanjang kurang lebih 2704 km (Goyal & Shrivastava, 2024; Khan & Wang, 2021; Mohamed et al., 2023; Moradi et al., 2020; Ramteke & Sahu, 2023).

Jalan Tol Trans Sumatera sendiri terdiri atas 22 ruas utama dan beberapa ruas sirip (pengumpan) yang dibagi ke dalam 4 tahapan konstruksi. Tahap pertama mencakup 14 ruas dimana sebagian besar ruas jalan tol tersebut saat ini telah beroperasi. Tahap kedua terdiri atas 4 ruas yang mencakup Ruas Betung – Tempino – Jambi, Jambi – Rengat, Rengat – Pekanbaru, dan Pelabuhan Panjang – Lematang. Konstruksi tahap kedua secara resmi dimulai pada tahun 2023 ini, dan ditargetkan dapat selesai pada tahun 2026 mendatang. Tahap ketiga, terdiri atas 5 ruas yang mencakup Ruas Dumai – Rantau Prapat, Rantau Prapat – Kisaran, Pangkalan Brandan – Langsa, Langsa – Lhoksumawe, dan Lhoksumawe – Sigli. Adapun tahap 4 dan tahap terakhir dalam pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera terdiri atas 9 ruas pada 3 segmen pengumpan yang menghubungkan Jalan Tol Trans Sumatera dengan kota Sibolga, kota Padang, dan kota Bengkulu.

Pengoperasian Jalan Tol Trans Sumatera tentu tidak terlepas dari beberapa persoalan. Adapun persoalan lapangan yang sering dan paling umum terjadi adalah persoalan geoteknik, salah satunya terkait dengan stabilitas lereng, baik lereng galian maupun lereng timbunan. Persoalan sebagaimana dimaksud juga terjadi pada Ruas Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, tepatnya di lokasi lereng galian KM 23+175 s.d KM 23+375 Jalan Tol Pekanbaru - Dumai Jalur B. Lereng di lokasi ini mengalami kelongsoran tak lama setelah jalan tol dioperasikan.

Lereng galian KM 23+175 s.d KM 23+375 sendiri merupakan lereng galian empat bench dengan ketinggian dan lebar masing - masing bench secara berurutan adalah 5m dan 2m sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.2. Adapun lereng yang mengalami longsoran adalah lereng pada slope ketiga dan keempat dari puncak galian. Berdasarkan data bor terdekat sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.3, dapat diketahui hingga kedalaman 28 m dari elevasi tanah orisinal tanah didominasi oleh pasir kelepungan dengan konsistensi loose hingga medium, dengan rentang nilai N-SPT dari 6 s.d 21. Adapun kedalaman muka air tanah berdasarkan data penyelidikan bor tersebut berada di elevasi ± 15 m.

Berdasarkan dokumentasi pelaksanaan pekerjaan yang diperoleh, dapat diketahui bahwa longsoran pada lereng tersebut awalnya bermula dari gerusan lokal pada area kaki lereng lereng galian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.5. Butiran tanah yang tergerus kemudian mengendap di sepanjang saluran sementara yang di kaki lereng galian. Kondisi ini hanya terjadi di lereng sisi kanan. Sementara lereng sisi kiri, dalam waktu yang sama tidak terlihat adanya gerusan dan endapan pada kaki lereng. Kondisi ini sedikit banyak dapat dijelaskan dengan memperhatikan bentuk bukit asli sebagaimana ditunjukkan Gambar 1, yang cenderung melandai ke arah kiri. Dengan kondisi topografi ini dapat ditarik kesimpulan jika gerusan tersebut terjadi karena adanya aliran bawah permukaan dari sisi kanan ke kiri bukit.



Gambar 1. Rona lereng pasca penggalian saat konstruksi berlangsung (2018)

Sumber: Dokumentasi Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Utama Karya (Persero), 2018

Kondisi lereng galian semakin parah setelah dilakukan pemasangan saluran permukaan berupa buis beton precetak setengah lingkaran pada berm lereng. Seperti yang ditunjukkan Gambar 1.6, dapat terlihat bahwa terdapat banyak sekali terbentuk rongga – rongga akibat gerusan di bawah saluran permukaan tersebut. Munculnya gerusan tersebut diduga kuat akibat konstruksi sambungan saluran pracetak yang tidak monolit sehingga air yang mengalir di saluran tersebut justru merembes keluar saluran dan mengalir secara liar di bawah saluran yang sudah terpasang. Pada kondisi dan intensitas tertentu, aliran air dari saluran ini mampu menggerus dan mengangkat butiran tanah sehingga memicu terbentuknya rongga sebagaimana dimaksud.

Aliran liar permukaan bersama – sama dengan aliran bawah permukaan lambat laun menggerus fraksi butiran halus dari tanah Pasir Kelepungan (SC) dan mengakibatkan masa tanah yang digerus berperilaku seperti pasir murni. Masa tanah ini sangat rentan terhadap perubahan kondisi air pori (Maulana & Agustina, 2024; Setiawan et al., 2018; Simorangkir & Suhendra, 2020; Standyarto et al., 2023; Yakin, 2022). Lambat laun, gerusan yang awalnya hanya lokal/setempat perlahan mulai memicu terjadinya longsoran yang lebih besar.

Sebelum jalan tol dioperasikan, sebenarnya sudah terdapat upaya untuk menutup rongga/longsor lokal tersebut dengan menggunakan material tanah baru yang memiliki kohesi/lekatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah aslinya. Namun demikian, penutupan rongga tersebut tidak dapat diikuti dengan pemadatan yang memadai. Satu – satunya pemadatan yang dilakukan hanya dengan menggunakan punggung bucket excavator yang ditekan ke timbunan penutup rongga tersebut dan mengakibatkan material baru ini tidak dapat melekat ke tanah asli dengan baik.



Gambar 2. Kondisi lereng setelah penanaman LCC mulai tumbuh lebat

Sumber: Dokumentasi Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Hutama Karya (Persero), Agustus 2020

Guna mengurangi dampak erosi permukaan yang terjadi, lereng tersebut kemudian ditanami vegetasi Legume Cover Crop (LCC) yang saat itu sering digunakan perkebunan sawit di sekitar proyek sebagai tanaman penutup area kebun. Namun demikian penanaman vegetasi tersebut tidak mampu menangani permasalahan stabilitas lereng yang terjadi utamanya di slope ke-4 sebagaimana ditunjukkan Gambar 1.7 di atas. Terlihat meskipun vegetasi sudah rimbun, di lereng bagian ini malah justru muncul banyak titik longsor lokal dengan panjang sekitar 10 hingga 20m. Longsor ini mengindikasikan bahwa sebenarnya permasalahan utama lereng ini belum tertangani hanya dengan mengendalikan erosi permukaan melalui penanaman vegetasi. Lereng galian tersebut dibiarkan bertahun – tahun tanpa adanya penanganan. Hingga awal tahun 2023, longsor yang terjadi sudah mencapai lereng ketiga.



Gambar 3. Kondisi Lereng KM 23+175 - KM 23+325 sebelum ditangani (est. 2021 s.d 2023)

Sumber: Dokumentasi Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Hutama Karya (Persero), 2021–2023

Pada bulan Januari tahun 2023, dalam rangka penyelesaian temuan serah terima hasil pekerjaan dan pemenuhan standar pelayanan minimum pengoperasian jalan tol dan desakan dari regulator, lereng tersebut pada akhirnya diputuskan untuk diperbaiki. Konsultan Perencana baru ditunjuk untuk menginvestigasi penyebab dan mengusulkan rencana penanganannya. Setelah melalui rangkaian perencanaan dan pembahasan bersama, lereng akhirnya direncanakan untuk diperbaiki dengan menggunakan perkuatan soil nailing dan facing shotcrete. Penanganan tersebut diajukan Konsultan Perencana berdasarkan pertimbangan dan asumsi bahwa penyebab utama terjadinya longsor di lokasi tersebut lebih kepada kurang memadainya sistem drainase permukaan.

Dalam perencanaannya, Konsultan Perencana melakukan analisis balik pada kondisi kritis at rest dan analisis stabilitas pada kondisi eksisting pasca longsor. Berdasarkan analisis tersebut diperoleh angka keamanan sebesar 1,08 pada kondisi kritis dan 1,02 pasca longsor. Detail desain perbaikan lereng sebagaimana dimaksud tersaji pada Gambar 1.10.

Konstruksi perbaikan lereng di KM 23 mulai dilaksanakan pada bulan Maret 2023 dengan mengacu kepada desain tersebut. Dengan mempertimbangkan metode pelaksanaan di lapangan, perbaikan lereng dimulai dari lereng paling atas menuju lereng paling bawah. Dan untuk mencegah debris mengalir menutup lajur lalu lintas, dipasanglah dua lapis median concrete barrier di sepanjang kaki bidang longsor.

Pekerjaan perbaikan lereng tersebut berjalan dengan lancar. Hanya saja ketika pekerjaan mencapai lereng ketiga, lereng yang tengah ditangani tersebut kembali mengalami longsor (lihat Gambar 4). Pekerjaan sempat dihentikan selama beberapa waktu untuk dievaluasi sebelum pada akhirnya dilanjutkan kembali dengan melakukan pemasangan shotcrete sesuai dengan kontur yang terbantuk. Setelah pekerjaan shotcrete pada lereng ketiga selesai, dilakukan uji geolistrik pada transisi lereng ketiga dan keempat satu lintasan arah memanjang jalan (lintasan pengujian geolistrik diwakilkan dengan garis warna biru. Hasil uji Geolistrik satu lintasan ditunjukkan pada Gambar 5. Dari pengujian tersebut diketahui bahwa terdapat konsentrasi air yang cukup tinggi hingga kedalaman kurang lebih -12m dari elevasi pengujian

($\pm 5\text{m}$ dari badan jalan). Berdasarkan hasil pengujian ini, kemudian disepakati untuk dipasang horizontal drain setiap jarak 5 hingga 6m pada kaki lereng galian sebelum pekerjaan shotcrete dilanjutkan ke lereng terakhir, yaitu lereng keempat.

Pekerjaan kemudian dilanjutkan ke lereng keempat. Pada lereng ini tidak lagi dilakukan pemasangan soil nailing setelah shotcrete terpasang. Beberapa penanganan tambahan, seperti pemasangan concrete barrier dan horizontal drain tetap dipertahankan dan menjadi bagian dari penanganan permanen lereng tersebut.



Gambar 4. Kondisi Lereng Pasca Penanganan Akhir

Sumber: Dokumentasi Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Utama Karya (Persero), 2023

Rangkaian kejadian longsor sebagaimana dijelaskan di atas mengindikasikan adanya produk perencanaan yang kurang sesuai dengan kondisi di lapangan. Keberadaan air tanah kurang diperhatikan baik pada saat merencanakan lereng di awal maupun pada saat merencanakan perbaikan lereng pasca longsor. Penelitian ini diajukan untuk mencari jawaban atas penyebab utama kegagalan lereng tersebut. Variasi kedalaman muka air tanah, analisis pendekatan crack soil dan beberapa alternatif penanganan lereng ditetapkan menjadi variabel uji untuk mengetahui pengaruhnya terhadap stabilitas lereng, baik pada saat sebelum terjadinya longsor (sesuai desain awal) maupun setelah penanganan longsor.

Peninjauan dengan menggunakan pendekatan crack soil ditetapkan berdasarkan pertimbangan bahwa tanah yang diuji bukan sepenuhnya pasir murni, melainkan tanah pasir lempungan yang secara perilaku masih mempunyai sifat – sifat tanah lempung seperti kohesi. Pertimbangan lainnya adalah ditemukannya gerusan dan rongga – rongga pada badan lereng yang mengindikasikan terangkatnya butiran halus dari masa tanah, yang secara konsep sejalan dengan pendekatan crack soil itu sendiri.

Evaluasi dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Geostudio Slope/W dengan pendekatan Metode Batas Keseimbangan (Limit Equilibrium Method, LEM). Penelitian ini diharapkan dapat mendefinisikan dengan lebih jelas penyebab longsor di awal serta mengevaluasi keandalan penanganan berdasarkan beberapa alternatif penanganan yang dimungkinkan ditinjau dari aspek teknis, biaya, dan pelaksanaan. Dengan demikian diharapkan dapat ditarik poin – poin pembelajaran yang dapat dimanfaatkan manajemen dalam memitigasi kasus serupa ke depannya.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini dirumuskan dalam empat pertanyaan utama, yaitu bagaimana stabilitas lereng galian sesuai dengan desain RTA Awal sebelum terjadinya kelongsoran, upaya penanganan apa yang dapat dilakukan untuk mencegah kelongsoran dan bagaimana efektivitasnya, bagaimana kondisi lereng sebelum dan sesudah konstruksi perbaikan, serta rekomendasi apa yang dapat diberikan untuk lereng terbangun berdasarkan evaluasi yang dilakukan. Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan lereng melalui pendekatan model numerik, mengevaluasi stabilitas lereng sesuai desain awal dan kondisi terbangun pasca perbaikan baik dari segi stabilitas internal maupun global, melakukan studi perbandingan atas beberapa alternatif penanganan lereng guna menguji efektivitas desain perbaikan yang saat ini terbangun di lapangan, serta melakukan evaluasi lebih lanjut atas seluruh temuan tersebut untuk merumuskan rekomendasi yang dapat diberikan sebagai masukan dan acuan bagi manajemen dalam menghadapi persoalan serupa ke depannya.

METODE PENELITIAN

Pengumpulan Data Sekunder & Studi Literatur

Penelitian ini menggunakan data sekunder sebagai input, yang diperoleh dari PT Utama Karya (Persero) khususnya Divisi Perencanaan Jalan Tol, Divisi Pembangunan Jalan Tol, dan Divisi Pembangunan Jalan Tol Ruas TIP Pekanbaru – Dumai. Adapun data sekunder tersebut antara lain:

1. Gambar RTA Awal dan RTA Perbaikan Lereng
2. Laporan Perencanaan RTA Perbaikan Lereng
3. Data Penyelidikan Tanah RTA Awal dan RTA Perbaikan Lereng
4. Dokumentasi Lapangan
5. Gambar Terbangun (*As Built Drawing*), khususnya untuk konstruksi perbaikan lereng

Sedangkan studi literatur yang dilaksanakan mencakup penulisan landasan teori yang mendukung penelitian serta kajian mendalam terkait dengan laporan perencanaan perbaikan lereng yang disusun oleh Konsultan Perencana Perbaikan Lereng.

Pengolahan Data Input Permodelan

Data sekunder yang sudah berhasil dikumpulkan kemudian diolah untuk dapat dijadikan sebagai input dalam tahap pemodelan dan analisis. Secara umum, terdapat dua data utama yang akan digunakan dalam penelitian ini:

1. Potongan Melintang dan Stratigrafi Tanah.

Disusun terlebih dahulu di aplikasi CAD untuk membantu memudahkan proses penggambaran geometri model di dalam program analisis Geostudio Slope/W. Di dalam penelitian ini akan disiapkan setidaknya 4 (empat) gambar potongan melintang:

- a. Potongan melintang sesuai dengan perencanaan awal, kemiringan slope 1:2
- b. Potongan melintang usulan alternatif penanganan,
- c. Potongan melintang pasca kelongsoran sebelum penanganan perbaikan lereng
- d. Potongan melintang sesuai dengan kondisi aktual terbangun

Masing – masing potongan melintang yang disiapkan akan digunakan sebagai input awal dalam menyusun geometri lereng di dalam program analisis yang digunakan. Setiap potongan melintang mewakili analisis yang akan dilakukan.

Adapun stratigrafi tanah akan disusun secara manual berdasarkan data penyelidikan tanah BH-45 yang terletak tidak jauh dari lokasi kejadian longsor. Data tersebut dipilih sebagai variabel pembanding yang terhadap desain perbaikan lereng yang disiapkan atau direncanakan oleh Konsultan Perbaikan Lereng sendiri.

2. Properti Material

Selain *input* geometri, dibutuhkan juga parameter *input* atas material yang dimodelkan yang setidaknya terdiri atas:

- a. Properti material tanah, yang mencakup kohesi, sudut geser dalam, dan berat jenis tanah. Untuk mendukung kelengkapan parameter tanah, akan digunakan pendekatan empiris atas parameter – parameter tanah yang tidak tersedia di dalam data penyelidikan tanah maupun hasil uji laboratorium yang sudah diperoleh.
- b. Properti *soil nailing*, yang setidaknya mencakup informasi panjang, diameter, mutu, sudut pemasangan *nail bar*, dan jarak pemasangan antar *nail bar* termasuk properti mekanis yang mencakup *tensile strength*, *bond capacity* (*pull out resistance*) dari *soil nailing* yang digunakan.
- c. Kedalaman muka air tanah. Ditentukan berdasarkan data penyelidikan tanah bor RTA awal, yaitu -15m. Untuk menggambarkan kondisi yang lebih buruk di musim penghujan, diasumsikan muka air tanah mengalami kenaikan hingga -12m.
- d. Properti material horizontal *drain*, mencakup diameter, panjang, sudut, dan jarak pemasangan.
- e. Properti *Median Concrete Barrier*, mencakup dimensi dan berat jenis.
- f. Pembebanan eksternal di sekitar struktur, yang setidaknya mencakup beban perkerasan dan beban lalu lintas.

Pemodelan Stabilitas Lereng sesuai dengan Desain RTA Awal

Permodelan tahap awal sendiri dilakukan untuk mengetahui stabilitas lereng sesaat setelah konstruksi galian sesuai desain RTA Awal selesai dikerjakan. Dengan dimodelkannya kondisi ini, dapat ditentukan bidang gelincir yang paling berpengaruh. Bidang gelincir inilah yang kemudian digunakan sebagai acuan dalam menilai dan mengevaluasi kondisi lereng sesuai desain awal.

Dalam tahap ini terdapat dua kelompok model yang disiapkan. Kelompok pertama untuk menganalisis stabilitas lereng dengan metode konvensional. Sementara kelompok kedua untuk menganalisis stabilitas lereng dengan pendekatan *soil crack*. Masing – masing kelompok model akan diterapkan muka air tanah dengan kedalaman -12m dan -15m. Hasil yang diperoleh dari analisis tersebut akan dijadikan dasar evaluasi apakah kenaikan muka air tanah serta asumsi *crack soil* merupakan salah satu penyebab/faktor yang memicu terjadinya kelongsoran.

Setelah itu, analisis dilanjutkan dengan menentukan bidang gelincir yang paling berpengaruh untuk diperoleh angka keamanan $\geq 1,5$. Bidang gelincir tersebut akan dijadikan kontrol untuk analisis dan evaluasi alternatif penanganan yang dapat dilakukan sebelum terjadi kelongsoran. Alternatif penanganan yang akan diuji adalah sebagai berikut

1. Alternatif 1, dengan mempertahankan lereng galian 1:2
Jika kemiringan lereng dipertahankan, maka upaya yang dapat dilakukan adalah
 - a. Dengan menurunkan muka air tanah sejauh mungkin dari permukaan lereng galian.
 - b. Poin a ditambah dengan perkuatan lereng dengan lining beton.

- c. Poin a ditambah dengan perkuatan lereng berupa *soil nailing* dengan *facing shotcrete*.

Beberapa alternatif penanganan tersebut akan dievaluasi dengan memasukkan bidang gelincir yang berpengaruh dari model original (sebelum penanganan) dan bidang gelincir baru untuk mengetahui *overall stability* dari sistem lereng yang dievaluasi.

2. Alternatif 2, memodifikasi kemiringan sebagian lereng menjadi 1:3

Merupakan alternatif moderat yang dapat ditawarkan yang diharapkan dapat mengurangi kebutuhan pemasangan instrumen perkuatan lereng yang secara biaya tergolong tidak murah. Jika terbukti aman, alternatif ini dapat menjadi alternatif penengah dari opsi yang paling ekstrem, 1 dan 3. Dimana kebutuhan untuk penyesuaian lereng kembali tidak semasif alternatif 3 dan pekerjaan perkuatan lereng dengan instrumen perbaikan tidak semasif alternatif 1. Pada model ini hanya akan digunakan angka aman paling kritis yang dihasilkan oleh *software*. Bidang gelincir kondisi awal sudah tidak lagi valid akibat perubahan geometri lereng galian.

3. Alternatif 3, memodifikasi seluruh kemiringan lereng menjadi 1:3

Merupakan alternatif paling ekstrem dengan harapan pekerjaan stabilisasi hanya cukup dengan memodifikasi pekerjaan tanah dan tidak memerlukan upaya lain selain pemasangan drainase yang memadai baik untuk aliran permukaan maupun adanya aliran bawah permukaan akibat pekerjaan galian di bawah muka air tanah. Sama halnya dengan alternatif 2, angka aman yang diambil merupakan angka aman paling kritis berdasarkan olahan *software*.

Pemodelan Stabilitas Lereng Kondisi Terbangun

Tahap selanjutnya adalah menganalisis dan mengevaluasi kondisi lereng terbangun. Untuk dapat mengevaluasi lebih lanjut, sama halnya dengan lereng kondisi awal (sesuai RTA), terlebih dahulu dilakukan analisis terhadap lereng sebelum dilakukan penanganan apapun kecuali pemasangan MCB di kaki lereng. Kondisi awal ini akan menjadi dasar dalam penentuan bidang gelincir yang paling berpengaruh untuk dijadikan sebagai dasar acuan analisis stabilitas internal lereng berikut dengan sistem perkuatan yang terbangun di lapangan.

Setelah itu barulah lereng dengan perkuatan *soil nailing* dan perkuatan sesuai kondisi terbangun dimodelkan. Terkait dengan adanya horizontal drain yang dipasang di lapangan, mengingat jarak pemasangan horizontal drain cukup berjauhan, yaitu setiap 5 hingga 6m, maka untuk mewakili kondisi tersebut akan dibuat dua model dengan kedalaman muka air tanah yang berbeda. Satu untuk mewakili kondisi yang *horizontal drain*-nya dapat berfungsi dengan efektif dalam menurunkan muka air tanah dan satu potongan lainnya diasumsikan untuk mewakili kondisi yang tidak terpengaruh oleh pemasangan *drain* tersebut, dimana muka air tanah tetap/tidak turun.

Hasil pemodelan seluruh kondisi akan dijadikan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan atas kondisi aktual lereng terbangun di lapangan. Apakah perlu dilakukan upaya tambahan untuk dapat meningkatkan stabilitasnya atau dicukupkan dengan catatan – catatan tertentu.

Evaluasi dan Alternatif Model Terbangun

Sama halnya dengan lereng sesuai RTA Awal, untuk lereng sesuai dengan kondisi terbangun juga akan dilakukan analisis terhadap alternatif penanganan yang sebenarnya bisa dipilih selain dengan menggunakan *soil nailing*. Alternatif penanganan yang diajukan dan akan

diuji lebih lanjut dalam penelitian ini adalah dengan alternatif melebarkan galian seluruh segmen dengan menggunakan kemiringan lereng yang lebih landai, yaitu 1:2,5.

Alternatif penanganan tersebut diajukan untuk dapat menjadi pembanding atas penanganan yang sudah terlaksana di lapangan. Perbandingan antara hasil evaluasi menyeluruh atas alternatif ini dengan desain perbaikan lereng terbangun akan menjadi dasar dalam menyusun rekomendasi ke depannya.

Selain menganalisis terhadap kemungkinan/alternatif lain penanganan yang dapat dilakukan, turut dianalisis juga upaya perkuatan yang mungkin dilakukan untuk meningkatkan stabilitas lereng terbangun jika diperoleh $SF < 1,5$. Usulan perkuatan yang akan dilakukan berupa penambahan baris *soil nailing* di badan galian serta penambahan jumlah *subdrain* mengingat apa yang terpasang di lapangan saat ini masih terbilang belum memenuhi.

Evaluasi Keseluruhan dan Penyusunan Rekomendasi Akhir

Tahap akhir dari penelitian ini adalah dengan melakukan perhitungan manual untuk mengcrosscek sekaligus memvalidasi hasil permodelan. Jika diperoleh hasil yang kurang lebih sama, maka permodelan dapat dianggap sudah tepat. Namun jika tidak maka perlu dilakukan pemeriksaan dan penyesuaian kembali pada model sehingga diperoleh hasil yang lebih akurat.

Akan dikaji lebih lanjut hubungan dari masing – masing variabel dengan stabilitas yang dihasilkan dari masing – masing model. Beberapa alternatif akan dibandingkan secara *head to head*, untuk dapat diperoleh beberapa poin pembelajaran penting dari kejadian yang dievaluasi.

Penulisan Hasil dan Pembahasan

Tahapan akhir dari rangkaian penelitian tesis ini adalah penyelesaian penulisan naskah tesis yang secara umum direncanakan terbagi ke dalam empat bagian sebagai berikut:

1. Pemutakhiran penulisan BAB I s.d BAB III yang merupakan bagian dari proposal tesis yang sudah diajukan sebelumnya
2. Penulisan BAB IV yang mencakup data dan analisis, hasil, dan pembahasan
3. Penulisan BAB V yang mencakup kesimpulan dan saran

Adapun penulisan untuk BAB IV dan V akan dilakukan bertahap seiring dengan kemajuan proses pengolahan data, pemodelan, dan analisis model. Skedul pelaksanaan dari penelitian ini diuraikan lebih lanjut pada poin pembahasan.

Luaran dan Hasil Studi

Sebagaimana diuraikan di dalam BAB 1 Pendahuluan, luaran (*ouput*) yang diharapkan dari studi ini mencakup identifikasi penyebab sebenarnya atas keruntuhan lereng awal serta evaluasi teknis terkait dengan kondisi dan stabilitas lereng pasca perbaikan sesuai dengan kondisi terbangun di lapangan. Adapun bentuk luaran yang dihasilkan dari penelitian ini terdiri atas informasi grafis hasil analisis pemodelan dengan perangkat lunak Geostudio Slope/W, perhitungan manual, tabulasi data, dokumentasi lapangan, serta analisis tertulis yang akan dibahas secara lebih mendetail di dalam BAB IV dan BAB V laporan tesis.

Luaran dan hasil studi penelitian ini diharapkan dapat membantu mengidentifikasi faktor yang menjadi penyebab utama longsor serta permasalahan lain yang ditemukan selama konstruksi perbaikan lereng berlangsung. Identifikasi ini berguna untuk dapat memahami karakteristik kegagalan lereng studi serta mengevaluasi terkait adanya peluang/potensi penanganan lain yang dapat menyelesaikan permasalahan yang ditinjau. Dengan jelasnya akar permasalahan, diharapkan dapat ditarik beberapa poin pembelajaran yang akan sangat berguna

sebagai petunjuk dan input dalam mengidentifikasi dan upaya memitigasi risiko, khususnya di tahap perencanaan.

Selain itu, penelitian ini juga disusun untuk dapat memberikan gambaran menyeluruh kepada manajemen terkait dengan kondisi dan stabilitas lereng aktual pasca konstruksi perbaikan lereng di lapangan. Apakah terdapat hal – hal yang perlu menjadi kekhawatiran atau perhatian, atau penanganan yang ada sudah cukup dan aman.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Penelitian

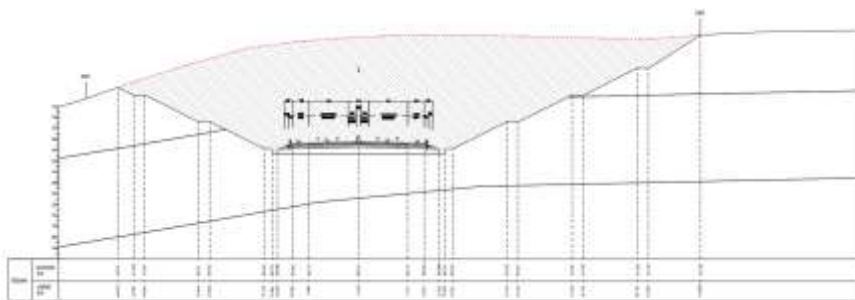
Dalam penelitian ini digunakan data sekunder yang diperoleh dari Tim Proyek Perbaikan Lereng Jalan Tol Ruas Pekanbaru – Dumai. Data tersebut mencakup: gambar plan dan potongan melintang badan jalan, laporan desain perbaikan lereng oleh Konsultan Perencana Perbaikan Lereng, data penyelidikan tanah RTA Awal, serta data pendukung lain yang diperoleh berdasarkan pendekatan empiris dari referensi luar. Data – data tersebut digunakan sebagai input dalam memodelkan, menganalisis, dan mengevaluasi penyebab serta desain/pelaksanaan perbaikan lereng studi.

Geometrik Lereng

Untuk mengevaluasi desain dan kondisi terbangun perbaikan lereng STA 23+175 s.d STA 23+350, digunakan beberapa jenis potongan melintang badan jalan pada berbagai kondisi. Potongan melintang ini merupakan basis input dalam mendesain geometrik model sebelum parameter tanah dan desain lainnya dapat diinputkan. Dalam penelitian ini digunakan empat potongan melintang dengan basis STA 23+300, yang mewakili masing – masing kondisi sebagai berikut:

1. Potongan melintang original sesuai dengan desain RTA awal
2. Potongan melintang pasca longsor
3. Potongan melintang sesuai dengan kondisi terbangun

Potongan melintang original sesuai dengan desain RTA Awal tersaji pada Gambar 4.1. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa lereng studi awalnya direncanakan terdiri atas 4 baris, dimana ketinggian masing – masing baris adalah 5m dengan kemiringan lereng 27° dan lebar *berm* 2m, atau total kedalaman galian mencapai $\pm 20\text{m}$.



Gambar 5. Potongan Melintang Galian Awal

Sumber: Data RTA Awal Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Utama Karya (Persero), 2018

Selanjutnya adalah potongan melintang pasca longsor. Gambar potongan melintang ini merupakan hasil penggabungan antara potongan melintang versi perencanaan perbaikan lereng yang sedikit dimodifikasi menyesuaikan dokumentasi longsor di lapangan. Modifikasi

tersebut dilakukan karena profil potongan melintang yang digunakan oleh Konsultan Perencana Perbaikan Lereng kurang mendekati kondisi asli lereng di lapangan. Sehingga untuk keperluan penelitian ini, lereng teratas pada potongan melintang Konsultan diubah mengikuti desain lereng awal. Modifikasi juga dilakukan pada lapisan debris. Lapisan debris didekati berdasarkan kondisi runtuh dan mahkota yang terbentuk di lapangan dengan bidang gelincir sirkular. Bentuk akhir dari potongan melintang pasca longsor disajikan pada Gambar 4.2.

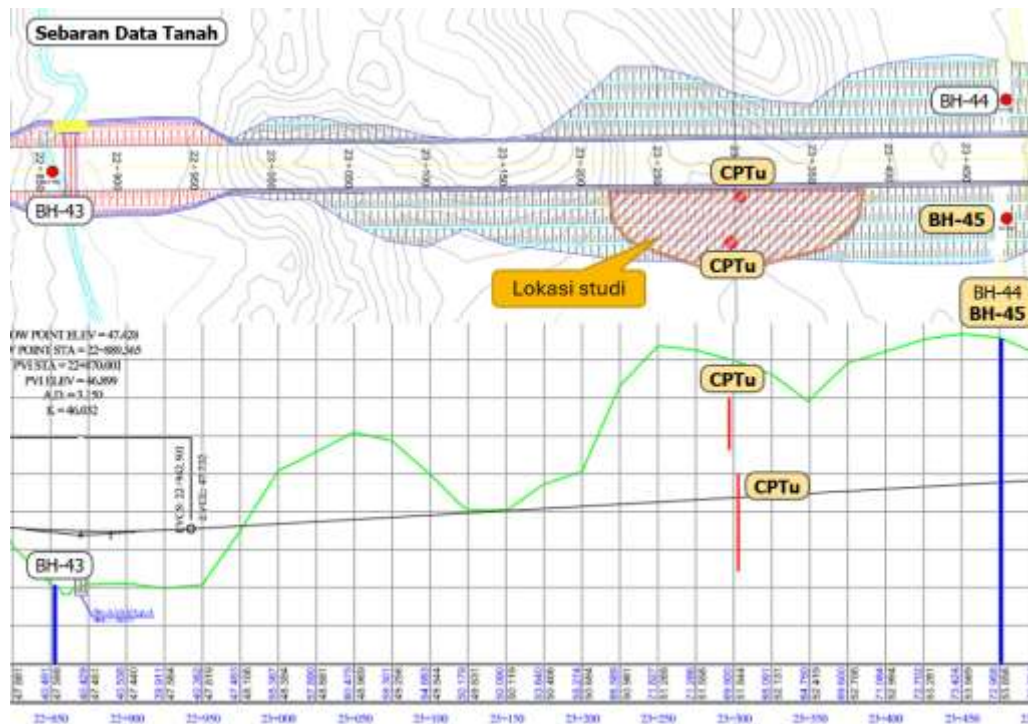
Potongan melintang terakhir adalah potongan melintang sesuai dengan kondisi terbangun sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.3. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kondisi terbangun dengan pasca longsoran. Perubahan hanya terletak pada perkuatan lereng serta lapisan debris yang sebagian sudah terpotong akibat pemasangan *Median Concrete Barrier* sebagai penahan kaki lereng.

Pada kondisi terbangun, perkuatan lereng yang diaplikasikan adalah kombinasi *soil nailing* dengan horizontal *subdrain* pada kaki lereng. *Soil nailing* sendiri terpasang pada 3 baris teratas lereng, dimana masing – masing baris terdapat 2 baris *soil nailing*. Masing – masing *soil nailing* memiliki panjang 8m, dengan sudut pemasangan 15° dan diameter total lubang *nailing* 15cm. Adapun *facing* yang digunakan adalah *shotcrete* dengan ketebalan 15 cm. Selain itu, untuk menurunkan muka air tanah, lapangan turut memasang horizontal *subdrain* berupa PVC perforasi yang diselimuti *geotextile* dengan panjang ±24m.

Potongan melintang ini digunakan sebagai input pemodelan untuk mengetahui kondisi lereng yang telah diperbaiki saat ini. Hasil dari pemodelan ini nantinya akan dibandingkan dengan hasil evaluasi lereng RTA Awal guna menguji tingkat keandalannya sekaligus menjadi input rekomendasi yang dapat diberikan atas kondisi saat ini.

Data Tanah

Pada penelitian ini secara total terdapat empat data penyelidikan tanah yang terdiri atas 2 borhole produk penyelidikan tanah RTA Awal, BH-44 dan BH-45 serta 2 data cpt yang diambil pasca terjadinya longsor. Sebaran data penyelidikan tanah tersaji pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 6. Sebaran Data Tanah pada Lokasi Lereng Tinjauan

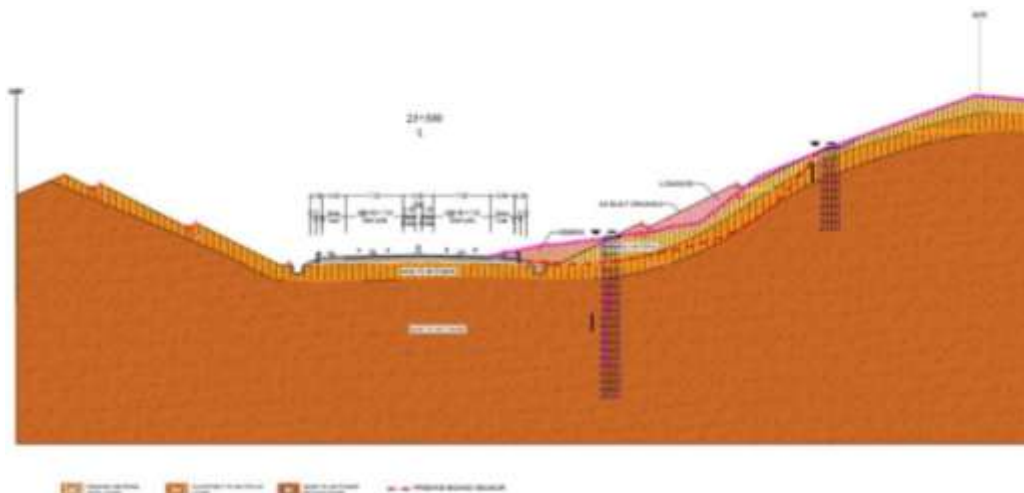
Sumber: Data Penyelidikan Tanah Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Utama Karya (Persero), 2018

Dari Gambar 6 dapat diketahui bahwasanya data bor BH-44 dan BH-45 saling berdekatan. Namun untuk keperluan penelitian ini, hanya data BH-45 saja yang digunakan baik dalam menentukan kembali perlapisan tanah maupun dasar dalam menentukan parameter tanah yang akan diinput ke dalam model. Pemilihan ini didasarkan atas pertimbangan lokasi BH-45 yang paling dekat dengan lokasi longsor serta data SEPRTI yang tidak terpaut jauh di antara keduanya.

Sementara itu, data sondir (cpt) dalam penelitian ini digunakan sebagai dasar dalam evaluasi sesuai desain perbaikan lereng sekaligus sebagai dasar dalam mengestimasi kembali area debris dan bentuk keruntuhan yang terjadi di lapangan.

1. Perlapisan Tanah (Stratigrafi Tanah)

Untuk keperluan evaluasi perbaikan lereng terbangun, dalam penelitian ini dilakukan pendekatan ulang atas perlapisan (stratigrafi) tanah yang digunakan dalam permodelan. Pendekatan baru ini dilakukan mengingat dalam perencanaan perbaikan lereng, Konsultan Perencana hanya mengandalkan 2 data sondir untuk membuat perlapisan tanah yang dioffset mengikuti profil galian yang terbentuk di lapangan.



Gambar 7. Stratigrafi Tanah pada Dokumen Perencanaan Perbaikan Lereng

Sumber: Laporan Perencanaan Perbaikan Lereng, Konsultan Perencana, 2023

Faktanya berdasarkan dokumentasi pekerjaan yang didapat, dapat diketahui bahwa perlapisan tanah di bawah profil galian tidak homogen dan cenderung menunjukkan kondisi lapis – lapis yang terpotong (Lihat Gambar 4.6(a)). Hal ini berkebalikan dengan apa yang diasumsikan oleh Konsultan Perencana. Atas dasar inilah stratigrafi tanah menjadi salah satu variabel uji dalam penelitian ini.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, perlapisan tanah yang digunakan pada penelitian ini dibuat dengan mengacu kepada data Bor BH-45. Secara umum, berdasarkan data tersebut, dapat diketahui bahwa s.d kedalaman 27m tanah eksisting didominasi oleh lapisan tanah *Clayey Sand* atau Pasir Lempung dengan konsistensi lepas (*loose*) hingga medium (*medium dense*). Sementara pada kedalaman 30 – 36m terdapat lapisan lempung kaku atau *Clay Stiff* sebelum pada akhirnya didominasi kembali oleh lapisan tanah berpasir. Muka air tanah per pembacaan data bor (tanggal 7 April 2017) adalah di kedalaman -15m atau ekuivalen dengan lereng baris ketiga dari puncak galian. Keseluruhan data bor BH-45 tersaji sebagaimana terlampir. Adapun rekapitulasinya tersaji pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Profil Data Bor BH-45

Depth	N-SPT	NSPT Corr	Jenis Tanah		
1	5	4.2	Clayey Sand	Loose	
2					
3					
4	7	5.8	Clayey Sand	Loose	
5					
6	12	10.0	Clayey Sand	Medium Dense	
7			12	10.0	Clay
8	6	5.0			Silty Sand
9					
10					
11	18	15.0	Silty Clay	Stiff	
12			Clayey Sand	Medium Dense	
13	21	17.5			
14					

15	18	16.5	Clayey Sand	Loose – Medium Dense
16				
17	19	17.0		
18				
19	16	15.5		
20				
21	14	14.5	Clayey Sand	Loose – Medium Dense
22				
23	5	10.0		
24				
25	11	13.0		
26				
27	12	13.5	Silty Clay	Stiff
28				
29	19	17.0		
30				
31	21			
32				

Sumber: Data Penyelidikan Tanah BH-45 Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Hutama Karya (Persero), 2017

Sebelum dapat digunakan dalam perencanaan, terlebih dahulu dilakukan koreksi terhadap nilai N-SPT yang tersaji dalam tabel. Koreksi sendiri dilakukan terhadap faktor efisiensi palu penumbuk, diameter lubang bor, dan jenis tabung *sampler* yang digunakan. Selain itu koreksi juga turut diterapkan pada data N-SPT di bawah muka air tanah. Perhitungan mengacu ke Persamaan 2-1 dan Persamaan 2-2.

Dengan mempertimbangkan data bor tersebut, lebih lanjut perlapisan tanah yang digunakan sampai direncanakan sampai kedalaman 30m yang dibagi ke dalam 3 lapis: *Clayey Sand – Loose*, *Clayey Sand – Medium Dense*, dan *Silty Clay – Stiff*, sebagaimana ditunjukkan dengan arsiran yang berbeda - beda pada Tabel 4.1 di atas.

2. Parameter Tanah

Tahap selanjutnya adalah mendefinisikan parameter tanah yang akan dimasukkan ke dalam model. Evaluasi dalam penelitian ini sendiri dilaksanakan dengan bantuan perangkat lunak Geostudio slope/w yang berbasis pada *Limit Equilibrium Method* (LEM) dipadukan dengan perhitungan manual sebagai pembuktian. Sedangkan metode perhitungan yang digunakan adalah metode *Bishop Simplified*.

Penelitian ini memodelkan material tanah sebagai material Mohr Columb. Adapun parameter tanah yang diinputkan mencakup berat jenis tanah γ , nilai kohesi c , dan nilai sudut geser tanah ϕ . Hasil uji laboratorium dari data tanah yang tersedia, BH-45, tidak digunakan begitu saja melainkan terlebih dahulu dievaluasi antara kesesuaian nilai pada laporan dengan karakteristik tanah asli baik dari deskripsi maupun dari dokumentasi sampel cor. Ringkasan data tanah hasil uji laboratorium BH-45 disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Summary Data Tanah BH-45

Depth N-SPT		Jenis Tanah		% Butiran Pasir			% Butiran Halus		Uji Lab	
				Coarse	Medium	Fine	Silt	Clay	C (kg/cm ²)	ϕ (°)
1	5	Clayey Sand	Loose	0	11	58,6	5,1	25,3	0,106	3,685
2										
3	7	Clayey Sand	Loose	0	8	60,7	6,4	24,9	0,083	22,43
4										
5	12	Clayey Sand	Medium Dense	0	8	60,7	6,4	24,9	0,083	22,43
6										
7	12	Clay	Stiff	0	6,1	53,6	10,3	30	0,164	5
8										
9	6	Silty Sand	Loose	0	6,1	53,6	10,3	30	0,164	5
10										
11	18	Silty Clay	Stiff	0	6,1	53,6	10,3	30	0,164	5
12										
13	21	Clayey Sand	Medium Dense	0	9,4	56,2	10,3	24,1	0,16	4,8
14										
15	18	Clayey Sand	Loose - Medium Dense	0,8	48,5	15,5	11,8	23,4	0,4226	9,61
16										
17	19	Clayey Sand	Loose - Medium Dense	0,8	48,5	15,5	11,8	23,4	0,4226	9,61
18										
19	16	Clayey Sand	Loose - Medium Dense	0,8	48,5	15,5	11,8	23,4	0,4226	9,61
20										
21	14	Clayey Sand	Loose - Medium Dense	0,8	48,5	15,5	11,8	23,4	0,4226	9,61
22										
23	5	Clayey Sand	Loose - Medium Dense	0	2,9	69,7	10,2	17,2	0,4226	9,61
24										
25	11	Clayey Sand	Loose - Medium Dense	0	2,9	69,7	10,2	17,2	0,4226	9,61
26										
27	12	Clayey Sand	Loose - Medium Dense	0	2,9	69,7	10,2	17,2	0,4226	9,61
28										
29	19	Silty Clay	Stiff	0	0	0	39,1	23,4	1,2148	0,99
30										
31	21	Silty Clay	Stiff	0	0	0	39,1	23,4	1,2148	0,99
32										

Sumber: Data Penyelidikan Tanah BH-45 Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Hutama Karya (Persero), 2017

Berdasarkan Tabel 2 di atas dapat diketahui bahwa terdapat inkonsistensi antara klasifikasi tanah dengan nilai sudut geser dalam pada kelompok tanah Pasir Kelempungan atau *Clayey Sand*. Dari total 5 data yang tersedia, hanya 1 data saja yang nilainya lebih besar dari 20°. Nilai tersebut bahkan masih terpaut jauh dari rentang nilai

sudut geser dalam tanah pasir konsistensi lepas hingga sedang menurut Peck, Hanson, Thornburn (1974), yaitu pada rentang 28,5 - 36.

Sedangkan nilai kohesi yang tertera dalam laporan masih berada dalam rentang yang wajar. Nilai kohesi hasil pengujian tersebut sebenarnya dapat digunakan untuk kebutuhan permodelan. Namun demikian dikarenakan adanya inkonsistensi data pada parameter sudut geser dalam, data hasil pengujian laboratorium tidak digunakan langsung melainkan hanya digunakan sebagai kontrol atas penentuan data parameter tanah melalui korelasi empiris dari beberapa sumber yang telah diuraikan pada BAB 2 laporan tesis ini. Rekapitulasi Data Properties Tanah untuk Permodelan yang terdapat pada tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Data Properties Tanah untuk Permodelan

Perlapisan	Tebal	NSPT avg	γ_{unsat}	γ_{sat}	Konvensional		Crack Soil	
					C (kPa)	ϕ (phi)	C (kPa)	ϕ (phi)
Clayey Sand Loose	11	10	16	18	2,5	27	0	27
Clayey Sand Medium Dense	16	15	17	19,5	5	30	0	30
Silty Clay Stiff	6	18	15	18	25	22	25	22

Sumber: Hasil Analisis Peneliti Berdasarkan Data Bor BH-45 dan Korelasi Empiris, 2024

Sebagaimana tertuang dalam Tabel 3 di atas, dalam penelitian ini dua lapisan tanah *clayey sand* dianalisis dengan pendekatan *crack soil* dimana nilai kohesi tidak diperhitungkan. Asumsi tersebut diambil, berdasarkan kondisi aktual lapangan yang memang terindikasi kuat terjadi *washing effect* pada butiran tanah lapisan pasir kelepungan, yang pada akhirnya mengakibatkan longsoran secara progresif. Gambar 8 menunjukkan bagaimana kondisi awal terjadinya “gerusan” yang berujung pada longsoran masif sebelum lereng tersebut diperbaiki di lapangan.



Gambar 8. a dan b Kondisi gerusan pada lereng, terutama kaki, pada saat konstruksi (a) dan operasional (b) yang mengindikasikan terjadinya *washing effect*

Sumber: Dokumentasi Proyek Jalan Tol Pekanbaru – Dumai, PT Hutama Karya (Persero), 2018–2023

Parameter Soil Nailing dan Evaluasi Stabilitas Lereng

Dalam pemodelan stabilitas lereng menggunakan Geostudio Slope/W, sistem perkuatan soil nailing dimodelkan berdasarkan beberapa parameter material yang merepresentasikan kapasitas elemen perkuatan dalam menahan gaya yang bekerja akibat pergerakan massa tanah. Parameter utama yang digunakan meliputi pull out resistance, tensile capacity, shear capacity,

bond diameter, serta jarak antar nail. Berdasarkan desain perbaikan lereng yang diterapkan di lapangan, jarak antar nail dimodelkan sebesar 2 m sesuai dengan rencana teknis konsultan perbaikan lereng. Adapun kapasitas tarik (tensile capacity) tulangan yang digunakan sebesar 206,2 kN, kapasitas geser (shear capacity) sebesar 123,7 kN, serta kapasitas lekatan (bond capacity/pull out resistance) sebesar 6,59 kN dengan mempertimbangkan faktor reduksi sesuai ketentuan analisis.

Parameter pull out resistance merupakan salah satu komponen penting dalam evaluasi kinerja soil nailing karena menggambarkan kemampuan lekatan antara material grouting dengan tanah di sekitarnya dalam menahan gaya pencabutan (pull out) akibat deformasi lereng. Nilai kapasitas ini dihitung berdasarkan hubungan antara diameter zona lekatan (bond diameter) dan kuat geser antarmuka tanah-grout. Dengan menggunakan diameter bond sebesar 0,1 m dan parameter lekatan tanah pasir kelepungan sebesar 60 kN/m², diperoleh kapasitas ultimit sebesar 18,85 kN/m. Sementara itu, kapasitas tarik soil nailing ditentukan berdasarkan luas penampang tulangan baja dan kuat leleh material. Pada tulangan dengan diameter 25 mm, diperoleh luas penampang sebesar 490,87 mm², sehingga dengan kuat leleh baja sebesar 420 N/mm² menghasilkan kapasitas tarik sebesar 206,2 kN. Selain tahanan tarik, kapasitas geser tulangan juga diperhitungkan untuk menggambarkan kemampuan elemen soil nailing dalam menahan gaya lateral akibat pergerakan tanah. Berdasarkan pendekatan konservatif, kapasitas geser dihitung sebesar 123,7 kN dengan mempertimbangkan 60% dari kuat leleh baja.

Hasil pemodelan awal menunjukkan bahwa kegagalan lereng pada Jalan Tol Trans Sumatera Ruas Pekanbaru–Dumai KM 23+175 s.d. KM 23+375 tidak hanya disebabkan oleh keterbatasan kekuatan tanah, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi hidrologi lereng, khususnya keberadaan muka air tanah yang menyebabkan peningkatan tekanan air pori. Karakteristik tanah penyusun lereng berupa pasir kelepungan dengan konsistensi lepas hingga medium menyebabkan lereng memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan kondisi air. Berdasarkan hasil analisis menggunakan pendekatan crack soil, kondisi paling kritis terjadi pada saat muka air tanah berada pada kedalaman sekitar -12 m, dengan nilai faktor keamanan (SF) kurang dari 1,00. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa lereng berada dalam keadaan tidak stabil dan memiliki potensi besar mengalami kelongsoran. Hasil analisis ini juga sesuai dengan kondisi lapangan yang menunjukkan adanya rembesan air, gerusan pada kaki lereng, serta fenomena hilangnya fraksi halus tanah akibat aliran air (washing effect).

Evaluasi terhadap berbagai alternatif penanganan menunjukkan bahwa pengendalian muka air tanah menjadi faktor paling dominan dalam meningkatkan stabilitas lereng dibandingkan hanya mengandalkan sistem perkuatan struktural. Pengurangan tekanan air pori melalui pemasangan sistem drainase bawah permukaan berupa subdrain atau horizontal drain memberikan peningkatan nilai faktor keamanan yang lebih signifikan karena mampu mengurangi gaya pendorong pada bidang longsor. Selain itu, kombinasi antara pengendalian muka air tanah, perlindungan terhadap erosi permukaan, serta modifikasi geometri lereng menghasilkan kondisi stabilitas yang lebih baik. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa pelebaran lereng dengan kemiringan yang lebih landai disertai sistem pengendalian air mampu meningkatkan faktor keamanan hingga mencapai lebih dari 1,50 tanpa tambahan perkuatan soil nailing. Namun demikian, alternatif tersebut tetap membutuhkan sistem perlindungan terhadap limpasan permukaan (runoff) untuk mencegah terjadinya erosi yang dapat menurunkan kestabilan lereng dalam jangka panjang.

Pada evaluasi terhadap kondisi lereng setelah dilakukan pekerjaan perbaikan menggunakan kombinasi shotcrete, soil nailing, horizontal drain, dan concrete barrier, hasil analisis menunjukkan bahwa struktur perbaikan secara umum telah mampu meningkatkan kestabilan lereng. Keberadaan soil nailing berfungsi memberikan tambahan tahanan internal melalui mekanisme gaya tarik dan geser, sedangkan shotcrete berperan sebagai lapisan perlindungan permukaan untuk mengurangi potensi erosi serta menjaga integritas permukaan lereng. Meskipun demikian, hasil evaluasi menunjukkan bahwa tingkat keamanan belum sepenuhnya seragam pada seluruh segmen lereng. Pada kondisi muka air tanah tinggi, nilai faktor keamanan mengalami penurunan hingga berada pada rentang 1,12–1,25. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun sistem perkuatan telah bekerja dengan baik, pengaruh air tanah masih menjadi faktor pengendali utama terhadap stabilitas lereng.

Temuan hasil pemodelan tersebut juga diperkuat oleh kondisi aktual di lapangan, yaitu ditemukannya rembesan air yang keluar melalui retakan pada lapisan shotcrete meskipun kondisi cuaca tidak menunjukkan adanya hujan. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa masih terdapat tekanan air internal yang belum sepenuhnya terkontrol oleh sistem drainase yang tersedia. Oleh karena itu, keberlanjutan fungsi sistem perkuatan perlu didukung dengan tindakan pemeliharaan dan peningkatan sistem drainase. Beberapa rekomendasi yang diberikan meliputi penambahan jaringan subdrain, perbaikan retakan pada shotcrete melalui metode injeksi (grouting), pemasangan instrumen pemantauan pergerakan tanah seperti inclinometer dan patok geser, serta peningkatan kapasitas drainase permukaan melalui saluran pengarah dan saluran peluncur.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem perbaikan lereng yang telah diterapkan menggunakan kombinasi soil nailing, shotcrete, dan sistem drainase telah memberikan peningkatan stabilitas yang cukup baik. Namun, faktor air tanah tetap menjadi aspek paling kritis yang harus dikendalikan dalam menjaga kestabilan jangka panjang. Dengan demikian, keberhasilan penanganan lereng tidak hanya bergantung pada kapasitas elemen perkuatan struktural, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh efektivitas sistem pengendalian air dan pemeliharaan infrastruktur pendukungnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng dan evaluasi berbagai alternatif penanganan, penelitian ini menyimpulkan bahwa penyebab utama longsoran awal adalah adanya muka air tanah dan perubahan perilaku tanah pasir kelempungan menjadi pasir lepas (crack soil), yang menghasilkan bidang gelincir dangkal dengan angka keamanan di bawah 1,00, sementara pada pendekatan konvensional lereng cenderung stabil dengan angka keamanan di atas 1,00. Evaluasi terhadap tiga alternatif penanganan menunjukkan bahwa secara teknis ketiganya mampu mencapai angka keamanan $\geq 1,50$, namun Alternatif 1 dan 2 memerlukan perkuatan soil nailing, sedangkan Alternatif 3 cukup dengan modifikasi kemiringan dan drainase bawah permukaan tanpa perkuatan. Pada kondisi terbangun, lereng yang telah diperkuat dengan soil nailing, barrier, dan shotcrete memiliki stabilitas global di atas 1,00, namun pada pendekatan crack soil angka aman belum mencapai minimum jangka panjang 1,50, terutama pada lokasi tanpa drainase bawah permukaan yang menurun drastis hingga 1,12–1,25 dibandingkan lokasi terpasang drainase dengan angka keamanan 1,40–1,54. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa pengendalian muka air tanah merupakan faktor mutlak untuk

memaksimalkan stabilitas lereng di lapangan. Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar analisis stabilitas lereng pada tanah pasir kelepungan mempertimbangkan pendekatan crack soil untuk mengantisipasi perubahan perilaku tanah akibat washing effect dan fluktuasi muka air tanah; pada lereng terbangun, disarankan penambahan subdrain, perbaikan retakan shotcrete melalui grouting, serta pemasangan instrumen pemantauan (inclinometer dan patok geser) untuk mendeteksi pergerakan tanah; dan bagi peneliti selanjutnya, disarankan studi lanjutan dengan variasi parameter tanah yang lebih beragam, pengujian skala penuh, serta analisis numerik tiga dimensi.

REFERENSI

- (BSN), B. S. N. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Badan Standarisasi Nasional.
- Das, B. M. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
- Geoengineer.org. (2021a). *Slope Stability: The Janbu Method*. <https://www.geoengineer.org/education/slope-stability/slope-stability-the-janbu-method>
- Geoengineer.org. (2021b). *Slope Stability: The Spencer Method of Slices*. <https://www.geoengineer.org/education/slope-stability/slope-stability-introduction-to-the-method-of-slices>
- Goyal, A., & Shrivastava, A. K. (2024). A Novel Heuristic and Tunicate Centered ANFIS and RCCRD Optimization for Soil Nailing Using a Numerical Approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, 108289. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108289>
- Institution, B. S. (2011). *BS 8006-2:2011 Code of practice for strengthened/reinforced soils Part 2: Soil nail design*. The British Standards Institution.
- Khan, M. I., & Wang, S. (2021). Slope Stability Analysis to Correlate Shear Strength with Slope Angle and Shear Stress by Considering Saturated and Unsaturated Seismic Conditions. *Applied Sciences*, 11(10), 4568. <https://doi.org/10.3390/app11104568>
- Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., & Berg, R. (2015). *FHWA-NHI-14-007 Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls - Reference Manual*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Maulana, R., & Agustina, D. H. (2024). Analisis Stabilitas Lereng dan Alternatif Perkuatan Soil Nailing pada Ruas Jalan Lingkar Serasan Kabupaten Natuna. *Sigma Teknika*, 7(1), 222–232.
- Mohamed, M. H., Ahmed, M., Mallick, J., & AlQadhi, S. (2023). Finite Element Modeling of the Soil-Nailing Process in Nailed-Soil Slopes. *Applied Sciences*, 13(4), 2139. <https://doi.org/10.3390/app13042139>
- Moradi, M., Pooresmaeili Babaki, A., & Sabermahani, M. (2020). Effect of Nail Arrangement on the Behavior of Convex Corner Soil-Nailed Walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(5), 4020026. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002235](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002235)
- Prasad, N. B. (2017). *Landslides-Causes & Mitigation*. Research Gate.
- Rahardjo, H., Hritzuk, K., Leong, E., & Rezaur, R. (2003). Effectiveness of horizontal drains for slope stability. *Engineering Geology*, 295–308.
- Ramteke, P. C., & Sahu, A. K. (2023). Enhancing Soil Slope Stability by Soil Nailing: A Comprehensive Review. *Zeitschrift Der Deutschen Gesellschaft Für Geowissenschaften*,

174, 729–744.

- Sabatini, P. J., Pass, D. G., & Bachus, R. C. (1999). *FHWA-IF-99-015 Geotechnical Engineering Circular No. 4 Ground Anchors and Anchored Systems*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Setiawan, L. C., Sentosa, G. S., & Iskandar, A. (2018). Analisis Stabilitas Lereng Batuan Dengan Metode Perkuatan Ground Anchor dan Soil Nailing di Labuan Bajo, NTT. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 1(1), 102. <https://doi.org/10.24912/jmts.v1i1.2247>
- Simorangkir, M. E., & Suhendra, A. (2020). Studi Pengaruh Kemiringan, Jarak, dan Panjang Soil Nailing Terhadap Stabilitas Lereng. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(3), 722–732. <https://doi.org/10.24912/jmts.v3i3.8754>
- Standyarto, A. N., Prayitno, A. Y., & Prayitno, D. (2023). Stabilisasi Lereng dengan Aplikasi Soil Nailing pada Area Galian Dalam dan Kemiringan Curam. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 40(2), 104–113.
- Umum, D. P. (1987). *SKBI-2.3.06 Petunjuk Perencanaan Penanggulangan Longsoran*. Yayasan Badan Penerbit PU.
- Yakin. (2022). Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan Soil Nailing Dikombinasikan dengan Macmat HS dan Shotcrete Menggunakan Metode Numerik Plaxis 2D. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.32672/jse.v7i2.4066>